

Primljen / Received: 24.1.2015.

Ispravljen / Corrected: 7.7.2015.

Prihvaćen / Accepted: 24.8.2015.

Dostupno online / Available online: 10.1.2016.

Optimalizacija oblika lučnih mostova s otvorenim nadlučnim sklopom

Autori:



Majid Pouraminian, dipl.ing.građ.
Sveučilište Islamic Azad, Teheran
Građevinski fakultet
majid.pouraminian@gmail.com



Prof.dr.sc. **Mohsen Ghaemian**, dipl.ing.građ.
Tehničko sveučilište Sharif, Teheran
Građevinski fakultet
ghaemian@sharif.edu

Prethodno priopćenje

[Majid Pouraminian, Mohsen Ghaemian](#)

Optimalizacija oblika lučnih mostova s otvorenim nadlučnim sklopom

U ovom se radu analizira lučni most s otvorenim nadlučnim sklopom. Računalni kod je izveden za izradu modela na temelju geometrijskih podataka, a radi rješavanja problema optimalizacije. U ovom se radu provodi postupak optimalnog projektiranja, a ukupan obujam materijala ugrađenog u donji ustroj mosta usvaja se kao objektivna funkcija. Donji ustroj sadrži stup i armiranobetonski luk. Na kraju je proveden i postupak optimalizacije pomoću algoritma za istovremeno stohastičko predviđanje poremećaja.

Ključne riječi:

lučni most, otvoreni nadlučni sklop, istovremeno stohastičko predviđanje poremećaja, optimalizacija uzdužnog presjeka

Preliminary report

[Majid Pouraminian, Mohsen Ghaemian](#)

Shape optimisation of concrete open spandrel arch bridges

An open spandrel arch bridge is analysed in this paper. A computer code is written to create a model from geometrical data, so as to solve the optimisation problem. An optimum design procedure is conducted in the paper, and the total material volume of the bridge substructure is adopted as an objective function. The substructure includes the column and the reinforced-concrete arch. Finally, the optimization technique is implemented using the Simultaneous Perturbation Stochastic Approximation algorithm.

Key words:

arch bridge, open spandrel, Simultaneous Perturbation Stochastic Approximation algorithm, longitudinal section optimisation

Vorherige Mitteilung

[Majid Pouraminian, Mohsen Ghaemian](#)

Optimierung der Form von Stahlbetonbogenbrücken mit Überbauten offenen Querschnitts

In dieser Arbeit wird eine Bogenbrücke mit Überbau offenen Querschnitts analysiert. Dafür wurde ein Computercode zur Modellgenerierung aufgrund geometrischer Daten erstellt, um das Optimierungsproblem zu bearbeiten. Dabei wurde das Verfahren des optimalen Entwurfs angewandt und das gesamte Volumen des für den Unterbau benötigten Materials als objektive Funktion angenommen. Der Unterbau umfasst Stütze und Stahlbetonbogen. Ebenso wurde die Optimierung mittels des Algorithmus für gleichzeitige stochastische Störungsvorhersagen durchgeführt.

Schlüsselwörter:

Bogenbrücke, Überbau offenen Querschnitts, ISPP Algorithmus, Optimierung des Längsschnittes

1. Uvod

Lučni mostovi imaju određena pozitivna obilježja zbog kojih su projektantima izuzetno zanimljivi. Neka od tih obilježja su [1]:

- odabir materijala nije ograničen jer je konstrukcija pogodna za razne vrste materijale,
- raspon varira do 500 m, a teoretski može biti i duži,
- takovi mostovi pogodni su za predjele uzdignutog reljefa,
- konstrukcije mostova estetski su vrlo dojmljive,
- nema podlokavanja jer stup mosta stoji na luku i ispod rasponskog sklopa (ili nadlučne konstrukcije) mosta.

Slijedeća obilježja ne idu u prilog odabiru lučnih mostova:

- ako su potrebni veliki rasponi, neke druge vrste mostova su ekonomski prihvatljivije,
- opasnost od izvijanja prisutnija je kod lučnih mostova u usporedbi s ostalim vrstama mostova,
- cijena skele visoka je kod mostova dugačkog raspona,
- peta luka treba biti usidrena u stjenovitom i krutom tlu.

Optimalizacija ovješanih mostova analizira se u radovima [2, 3], gdje se kao ograničenja navode naprezanja zatega i pomaci rasponskog sklopa mosta. Aydin i dr. [4] proučavali su doprinos genetskog algoritma optimalizaciji projektiranja rasponskog sklopa mosta. Niti u jednom od tih radova ne primjenjuje se algoritam ISPP. Baldomir i dr. [3] koriste optimalizacijski alat MATLAB u svrhu smanjivanja ukupnog obujma čeličnih kabela što se tretira kao objektivna funkcija. Togan i Daloglu [5] primjenjuju postupak za optimalizaciju projekata na temelju pouzdanosti (eng. *reliability-based design optimization* - RBDO) a u svrhu optimalizacije veličine elemenata mostovnih konstrukcija. Guan i dr. [6] primjenjuju evolucijsku metodu optimalizacije topologije konstrukcija baziranu na glavnim naprezanjima i to u svrhu optimalizacije lučnih mostova, lučnih mostova sa zategom, ovješanih mostova i visećih mostova. Pritom se vrijednosti naprezanja, pomaka i frekvencije analiziraju kao ograničenja. Makiabadi i dr. [7] primijenili su algoritam za optimalizaciju veličine baziran na učenju (eng. *teaching-learning based size optimization* - TLBO) u svrhu optimalizacije veličine stvarnih rešetkastih mostova. U većini prethodnih radova naglasak je na optimizaciji veličine (presjeka) i topologije elemenata mostovnih konstrukcija. U ovom se radu predlaže metodologija za optimaliziranje uzdužnog profila lučnih mostova s otvorenim nadlučnim sklopom.

2. Opis mosta

Za analizu konkretnog slučaja izabran je most preko rijeke Cetine. To je otvoreni lučni armiranobetonski most kojim se premošćuje kanjon rijeke Cetine u blizini grada Trilja. Raspon luka je 140 m, a visina je luka 21,5 m, što znači da odnos između visine i duljine iznosi 1/6,5. Slika 1. prikazuje izgled mosta preko Cetine. Potrošnja materijala tijekom gradnje mosta preko Cetine, bez upornjaka i temelja, prikazana je u tablici 1. Ukupni

obujam armiranog betona iznosi 35 % za gornji ustroj i 65 % za donji ustroj. Ukupna količina armiranog betona korištenog u gornjem i donjem ustroju iznosi 32 % za gornji ustroj i 68 % za donji ustroj [8].

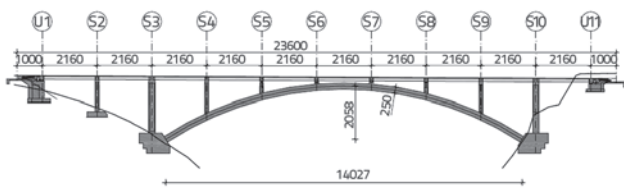
Slika 2. prikazuje uzdužni profil mosta preko Cetine. Gornji ustroj koji kontinuirano prelazi preko deset polja sastoji se od montažnih prednapetih betonskih nosača, od ploče mosta lijevane na gradilištu, te od poprečnih nosača na mjestima podupora. Ploča leži na devet stupišta, od kojih je šest spojeno s lukom (slika 2.). Sve su dimenzije iskazane u metrima. Stupovi su poprečno spojeni s naglavnom gredom duljine 8,3 m. Oni su sandučastog presjeka, 1,5 m x 1,8 m, sa zidovima debljine 30 cm, osim kod najviših stupova koji se nalaze na peti luka. Poprečni presjeci pojedinačnih stupova određeni su iz uvjeta stabilnosti (slika 3.). Luk je konstantnog poprečnog presjeka s jednom šupljinom vanjskih dimenzija 5,5 m x 8,0 m (slika 4.). Luk je izveden od betona razreda C45/55 [8]. U tablici 1. vidimo da je najveća količina betona ugrađena u lučnu konstrukciju. Prilikom konzolnog izvođenja betonskog luka, na obje strane luka podignut je toranj (visine izražene kraticom H), i na taj su toranj pričvršćene zatege. Najčešće su korištene zatege s 12, 15 i 19 užadi.



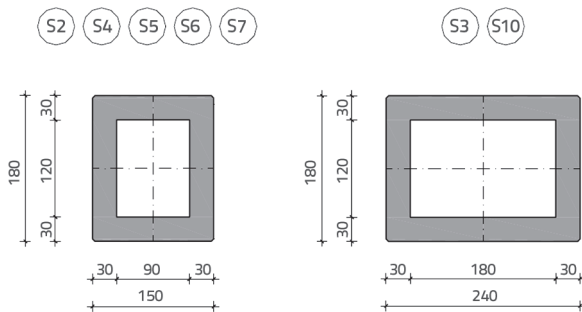
Slika 1. Pogled na most preko rijeke Cetine

Tablica 1. Potrošnja materijala na mostu preko Cetine

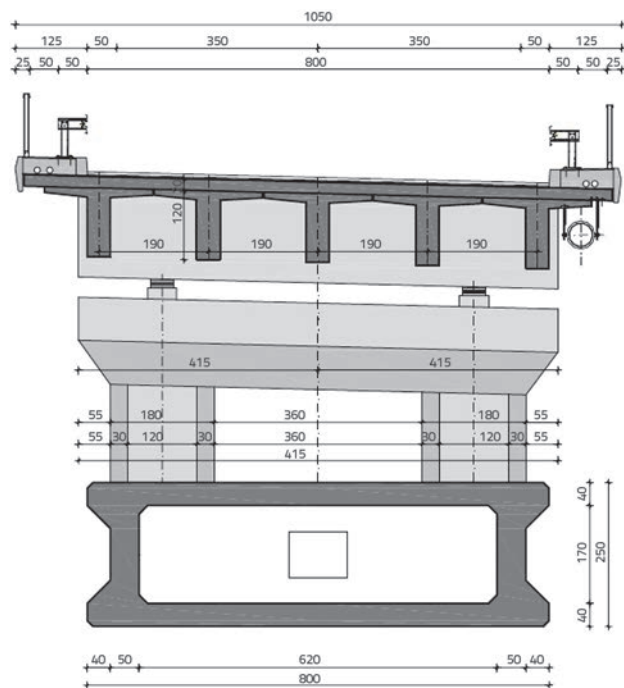
Potrošnja materijala		Količina	Potrošnja
Vrsta materijala			
Beton	Luk	1411 m ³	0,69 m ³ /m ²
	Stupovi	615 m ³	0,30 m ³ /m ²
	Montažni T-nosač	693 m ³	0,34 m ³ /m ²
	Ploča mosta	445 m ³	0,22 m ³ /m ²
Armatura	Luk	545,2 t	265,4 kg/m ²
	Stupovi	196,1 t	96 kg/m ²
	Montažni T-nosač	151,8 t	73,9 kg/m ²
	Ploča mosta	193,7 t	94,3 kg/m ²
Natege	Montažni T-nosač	33,8 t	16,5 kg/m ²



Slika 2. Presjek mosta preko Cetine [8]



Slika 3. Presjek stupova



Slika 4. Presjeci luka i gornjeg ustroja mosta preko Cetine [8]

3. Algoritam za optimalizaciju

Algoritam za istovremeno stohastičko predviđanje poremećaja bazira se na gradijentu, a razvio ga je Spall (1994.). Radi se o snažnom algoritmu koji se koristi za optimiziranje složenih sustava. Jedna od značajki algoritma istovremenog stohastičkog predviđanja poremećaja jest ta da su mu potrebne samo dvije konstrukcijske analize u svakoj iteraciji postupka optimalizacije, i to bez obzira na veličinu problema za koji se obavlja optimalizacija.

Zbog svoje značajke "slučajnosti", kod toga se algoritma povećava mogućnost postizanja opće optimalizacije. Koraci provedbe algoritma za istovremeno stohastičko predviđanje poremećaja objašnjeni su u šest koraka kako slijedi [9].

Prvi korak:

U ovom se stadiju odabire broj $k = 1$ i određuje se rana vrijednost X nasumičnim pretraživanjem prostora. Ne negativne konstantne vrijednosti a , c , A , γ , α ulazni su podaci. Nakon toga se izračunavaju vrijednosti c_k i a_k prema jednadžbama (1) i (2):

$$c_k = \frac{c}{k^\gamma} \quad (1)$$

$$a_k = \frac{a}{(A + k)^\alpha} \quad (2)$$

Drugi korak:

Izvođenje slučajnog vektora poremećaja Δ_k treba se obaviti u skladu s posebnim uvjetima. Svaka varijabla n ovog vektora izvodi se neovisno pomoću funkcije vjerojatnosti raspodjele, gdje je srednja vrijednost jednaka nuli. Primjena Bernoullijeve raspodjele ± 1 , pri čemu vjerojatnost iznosi $\frac{1}{2}$, smatra se jednostavnim i pogodnim izborom za svaki unos. Na primjer, $\Delta^T = \{-1, 1, -1, 1, -1, 1, -1, 1, -1, 1\}$ je uzorak vektora izvedenih pomoću Bernoullijeve raspodjele s deset unosa.

Treći korak:

Gornje i donje granice funkcije u promatranoj točki izračunavaju se za istovremeni poremećaj svih unosa u vektor X , tako da se dobije objektivna funkcija; stoga se $y(X_k + C_k \cdot \Delta_k)$ i $y(X_k - C_k \cdot \Delta_k)$ mjere primjenom vrijednosti C_k i Δ_k koje su izračunane u prethodnim koracima.

Četvrti korak:

U ovom se koraku koristi jednadžba (3) za izračunavanje približnog gradijenta funkcije. $\hat{G}_k(X_k)$ je približni gradijent funkcije u iteraciji k postupka optimalizacije, dok je Δ_{kj} unos j iz vektora Δ_k :

$$\hat{G}_k(X_k) = \frac{y(X_k + c_k \cdot \Delta_k) - y(X_k - c_k \cdot \Delta_k)}{2 \cdot c_k} \begin{bmatrix} \Delta_{k1}^{-1} \\ \Delta_{k2}^{-1} \\ \vdots \\ \Delta_{kj}^{-1} \\ \vdots \\ \Delta_{kp}^{-1} \end{bmatrix} \quad (3)$$

Peti korak:

U ovom se koraku ažurira vrijednost X pomoću jednadžbe (4) primjenom približnog gradijenta iz prethodnog koraka: dakle X_k se pretvara u X_{k+1} za proračun u sljedećem koraku:

$$X_{k+1} = X_k - a_k \cdot \hat{G}_k(X_k) \quad (4)$$

Potrebno je paziti da izračunana vrijednost X ne prijeđe dopuštenu granicu X . Granični uvjeti se trebaju kontrolirati u

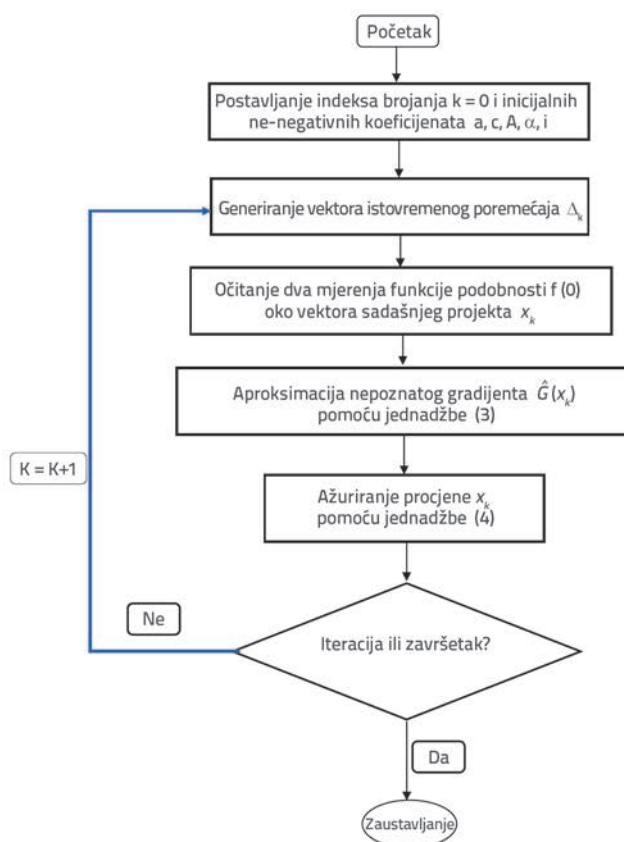
svakom koraku optimizacije. Stoga se X_{k+1} odobrava pomoću jednadžbe (5):

$$X^l \leq X_{k+1} \leq X^u \quad (5)$$

gdje je X^u gornja granica, dok je X^l donja granica vektora X . Vrijednost X treba se korigirati ako prelazi tu granicu, a sljedeći se korak može provesti primjenom tako korigirane vrijednosti.

Šesti korak:

U ovom se koraku program zaustavlja ako je ispunjena kvota dopuštenih iteracija. Ako to nije slučaj, ponavljaju se koraci od 2 do 5. I na kraju, najmanje objektivna vrijednost funkcije, za koju su ispunjeni svi uvjeti tijekom postupka optimizacije, usvaja se kao optimizirani odgovor. Postupak za istovremeno stohastičko predviđanje poremećaja koji se primjenjuje za optimizaciju lučnih mostova prikazan je na slici 5. [10].



Slika 5. Dijagram algoritma za istovremeno stohastičko predviđanje poremećaja [10]

Problem optimizacije oblika sastoji se u iznalaženju proračunskih varijabli X uz minimaliziranje objektivne funkcije $F(x)$ pod funkcijama poremećaja $h_j(X)$ i $g_k(X)$, što se matematički može izraziti na način prikazan u jednadžbama od (6) do (8):

$$\text{Find: } X = [X_1 X_2 \dots X_n]^T, a_i \leq X \leq b_i \quad (i = 1, \dots, n) \quad (6)$$

Da bi se minimalizirala vrijednost $F(x)$,

$$h_j(X) = 0 \quad (j = 1, \dots, p) \quad (7)$$

$$g_k(X) \leq 0 \quad (k = 1, \dots, m) \quad (8)$$

Budući da je ploča mosta ovisna o razini ceste, pretpostavljeno je da je visina ploče konstantna. Osim toga, promjene u geometriji betonskog luka dovode do promjena u visini stupova mosta. U donjem ustroju mosta ugrađena je velika količina betona. Dijelovi donjeg ustroja jesu stup i luk s presjekom u jednom polju. Zato je u ovom ispitivanju beton korišten u luku i stupovima odabran kao objektivna funkcija, kao što se to vidi u jednadžbi (9). Jednadžbe (10) i (11) smatraju se vlačnim ograničenjima, jednadžbe (12) i (13) funkcionalnim ograničenjima, a jednadžbe od (14) do (17) geometrijskim ograničenjima.

$$V_{\text{Donji ustroj}} = V_{\text{Luk}} + V_{\text{Stup}} \quad (9)$$

u ovisnosti o:

$$\sigma_i \geq \sigma_{\max}^c \quad i = 1, 2, \dots, \text{nip} \quad (10)$$

$$\sigma_i \leq \sigma_{\max}^t \quad i = 1, 2, \dots, \text{nip} \quad (11)$$

$$\delta_i \leq \delta_{\max}^v = \frac{S}{800} \quad i = 1, 2, \dots, \text{nip} \quad (12)$$

$$\delta_i \leq \delta_{\max}^h = \frac{H}{800} \quad i = 1, 2, \dots, \text{nip} \quad (13)$$

$$\frac{t_c}{t_L} - 1 \leq 0 \quad (14)$$

$$\frac{t_c}{t_R} - 1 \leq 0 \quad (15)$$

$$\frac{R_{\text{Rint}}}{R_{\text{Rext}}} - 1 \leq 0 \quad (16)$$

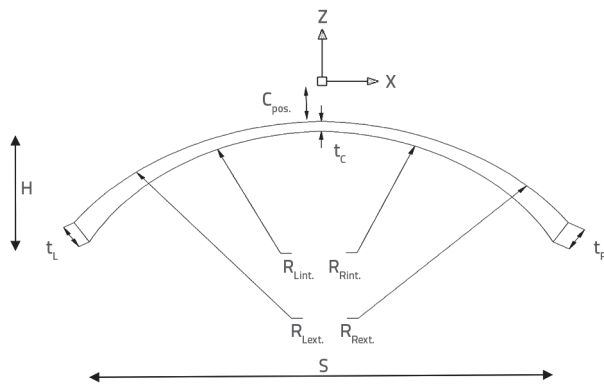
$$\frac{R_{\text{Lint}}}{R_{\text{Lext}}} - 1 \leq 0 \quad (17)$$

Vrijednost "n" označava broj proračunskih varijabli. Donji indeksi j , k , i označavaju broj ograničenja jednakosti, ograničenja ponašanja, i proračunskih varijabli. a_i i b_i su dopuštene donje i gornje granice proračunskih varijabli koje su uvedene radi rješavanja raznih zahtjeva. Ova optimizacija ne sadrži ograničenja jednakosti. Vrijednost s_i je osnovno vlačno naprezanje u i -toj točki integracije, dok su σ_{\max}^t i σ_{\max}^c maksimalna dopuštena vlačna i tlačna naprezanja. Oznaka "nip" predstavlja ukupan broj točaka integracije u elementima luka mosta (eng. *number of integration points - nip*), dok su S i H raspon luka i visina tornja. Središnja deformacija betonskog luka, i horizontalni pomak zatege koja drži toranj, ne smiju prelaziti dopuštene vrijednosti.

4. Primjena metode konačnih elemenata

Ograničenja modela u pogledu naprezanja i pomaka trebaju se kontrolirati pomoću algoritma optimizacije nakon svake

slučajno odabrane geometrije mosta. Nakon modeliranja geometrije, program analizira konstrukciju mosta. U ovom se dijelu prikazuju značajke modela konačnih elemenata koje se koriste u svakoj iteraciji. Za potrebe analize razvijen je trodimenzionalni model konačnih elemenata. Glavni raspon i stupovi simulirani su pomoću elemenata s dva čvora (linijskih elemenata) s tri translacijska stupnja slobode i tri rotacijska stupnja slobode na svakom čvoru. Prostorni element s osam čvorova korišten je za armiranobetonski neprizmatični ošupljeni luk. Pretpostavljeno je da su svi elementi linearni izoparametarski elementi. Puni model konačnih elemenata sastojao se od 94 linijska elementa, 252 prostorna elementa i 380 čvorova. Glavni betonski luk upet je na upornjacima. U ovom se istraživanju razmatra samo linearno elastično ponašanje, dok se optimizirani oblici i hrbat luka ne ispituju na izvijanje, nelinearnost materijala i velike deformacije [11].



Slika 6. Konfiguracija geometrije luka i definicija oblika proračunskih varijabli

5. Opis programa

Program je razvijen pomoću koda MATLAB u svrhu generiranja koordinata čvorova te, nakon toga, konačnih elemenata radi modeliranja geometrije lučnog mosta. Na kraju je proveden postupak optimizacije pomoću algoritma za istovremeno stohastičko predviđanje poremećaja (ISPP). Za definiranje geometrije luka u uzdužnim profilima korištene su parabolične konusne funkcije.

U programu su predviđena četiri koraka:

- slučajno parametarsko generiranje geometrije mosta pomoću programa MATLAB,
- upotreba metode konačnih elemenata pomoću ANSYS-a radi analiziranja postupka građenja,
- optimizacija oblika presjeka i uzdužnog profila luka,
- kontrola optimalnog proračuna pod vlastitom težinom luka u fazama gradnje, prometno opterećenje i opterećenje vjetrom.

Proračunske varijable su: visina poprečnog presjeka luka pri peti (t_L ; t_R), visina u tjemenu luka (t_C), polumjeri gornjeg i donjeg obrisa luka (R_{Lext} ; R_{Rext} i R_{Lint} ; R_{Rint}), te položaj tjemena

u odnosu na globalne osi (C_{pos}). Prema modelu prikazanom na slici 6., most se može kreirati pomoću vektora X koji ima osam komponenata uključujući i parametre oblika lučnog mosta, i to na sljedeći način:

$$X = \{t_C; t_{AL}; t_{AR}; C_{pos}; R_{Lint}; R_{Rint}; R_{Lext}; R_{Rext}\} \quad (18)$$

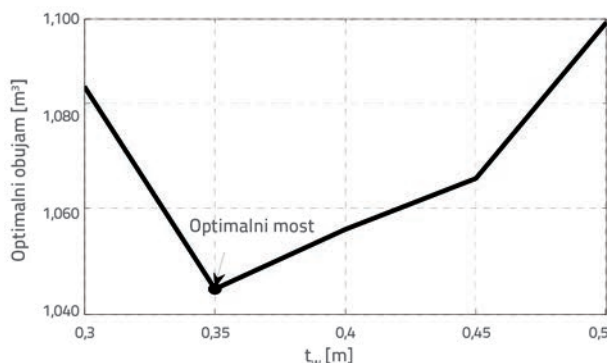
Geometrijski opis lukova mostova utemeljen na proračunskim varijablama prikazan je na slici 6.

Računalni kod napisan je za optimizaciju simetričnog i nesimetričnog oblika lučnih mostova. Proračunske varijable razmotrene su odvojeno za lijevu i desnu stranu mosta, pri čemu su se za lijevo i desno koristile oznake L i R. Optimizacija se provodi da bi se odredio optimizirani oblik luka mosta. Stoga su pretpostavljene konstantne vrijednosti za udaljenost između stupova, te za visinu nosača i ploče. U procesu optimizacije pretpostavljena je konstantna udaljenost između stupova od 21,6 m. Pouzdani su rezultati dobiveni kada je ovaj model korišten za uspoređivanje prvobitnog i optimiziranog projekta. Promjene udaljenosti između stupova dovode do promjene sila koje djeluju na luk. Ni poprečni presjeci stupova nisu usvojeni kao proračunske varijable. Umjesto toga poprečni presjeci stupova odabrani su tako da budu proporcionalni u odnosu na stupove analiziranog projekta. Najveći dio praktičnih proračunskih varijabli i ograničenja razmotren je tijekom formuliranja problema. U obzir su uzete tri vrste proračunskih ograničenja: ograničenja u pogledu naprezanja luka, ograničenja zbog poprečnog naprezanja u tjemenu luka, te geometrijska ograničenja. Za svaku vrstu mosta korištene su odgovarajuće vrijednosti graničnog pomaka. Te su vrijednosti određene na temelju preporuka koje se daju u kineskim uputama za projektiranje cestovnih mostova te u australskom zakoniku za mostove [12, 13] gdje progib pod uporabnim opterećenjem ne smije prelaziti vrijednost od 1/800 glavnog raspona mosta [6]. Debljine hrpta luka nisu usvojene kao proračunske varijable. Optimizacija oblika obavljena je za svaku debljinu hrpta mosta. Razni optimalni obujmi prikazani su za razne debljine hrpta na slici 7. Vrijednost od 35 cm usvojena je za debljinu hrpta koja se uzima kao konstantni proračunski parametar u postupku optimizacije. Beton visoke čvrstoće i lokalno pojačanje armaturom mogu se primijeniti da bi se na taj način osigurala dostatna čvrstoća za sidrenje zatege u hrbat luka. Stopa konvergencije objektivne funkcije u postupku optimizacije prikazana je na slici 8. Nakon postupka optimizacije, obujam donjeg ustroja smanjio se za 30 % u usporedbi s prvobitnim projektom. Optimizirani vektor proračunskih varijabli prikazan je u jednadžbi (19):

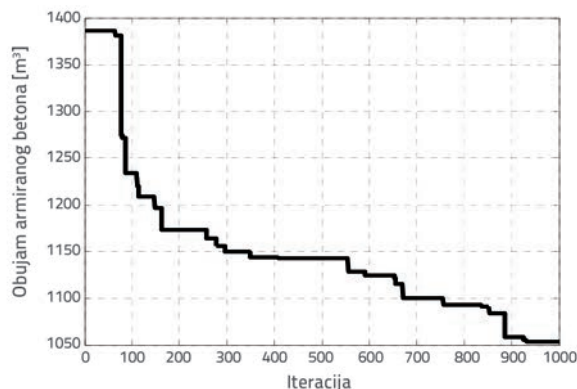
$$X^{optimum} = \{1,8 \text{ m}; 2,5 \text{ m}; 2,5 \text{ m}; 0,36 \text{ m}; 117^\circ; 117^\circ; 120^\circ; 120^\circ\} \quad (19)$$

Očito je da je optimizirani projekt simetričan za simetriju između početne geometrije konstrukcije i opterećenja. Polovica optimiziranog luka prikazana je na slici 9. Odnos

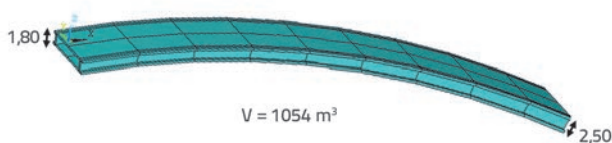
visine i duljine otvora jedan je od parametara koji su značajni za ponašanje konstrukcije luka. Ova je vrijednost smanjena s 0,147 u prvobitnom projektu na 0,136 u optimiziranom projektu. Uočeno je da se smanjenjem duljine luka postiže pad te vrijednosti od 7,5 %. Odnos između visine luka u srednjem dijelu presjeka i visine u bočnom dijelu presjeka iznosi 1 u prvobitnom projektu, tj. 0,7 u optimiziranom projektu. U optimiziranom projektu se visina središnjeg dijela smanjuje za 28 %, a u bočnom dijelu nema promjene.



Slika 7. Optimalan obujam za različite debljine hrpta



Slika 8. Konvergencija obujma mostovne konstrukcije



Slika 9. Optimalan oblik luka mosta

6. Analiza postupka građenja

Popuštanje mosta tijekom građenja jedno je od vrlo bitnih pitanja kojima se bave projektanti mostova. Stoga se u ovom dijelu razmatra optimalan oblik luka u ovisnosti o proračunskim opterećenjima koja se mogu javiti tijekom građenja. Optimizirana proračunska čvrstoća treba se provjeriti uzimajući u obzir uzastopna opterećenja faza građenja, stalna, promjenjiva opterećenja i prometno opterećenje.

6.1. Proračunska opterećenja

U analizi postupnog građenja mosta u obzir su uzete tri vrste opterećenja:

Stalno opterećenje: sva su stalna opterećenja primijenjena statistički u negativnom smjeru Z, kao što se to vidi na slici 6.

Korisno opterećenje: Kako se na mostu preko Cetine odvija promet pomoću dvosmjerne ceste koja je s obje strane obrubljena pješačkim stazama širine 1,25 m, u konačnoj fazi u obzir se uzima opterećenje prometom vozila i pješaka. Radi jednostavnosti, pretpostavljeno je da su primijenjena prometna opterećenja ravnomjerno raspoređena po ploči mosta. Pretpostavljeno je da proračunsko korisno opterećenje iznosi 5600 N/m [14, 15].

Opterećenje vjetrom: Za potrebe projektiranja mosta opterećenje vjetrom određeno je na osnovi Kineske upute za projektiranje utjecaja vjeta na cestovnim mostovima. Greda i betonski luk analizirani su pomoću sljedeće tri komponente opterećenja vjetrom: sila potiska (F_y), sila odizanja (F_z), i moment propinjanja (M) (jednadžbe 20 do 22):

$$F_y = \frac{1}{2} \rho V_z^2 C_y D \quad (20)$$

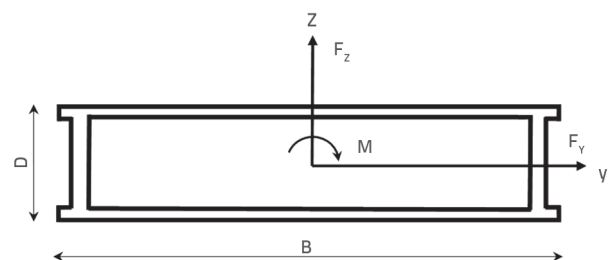
$$F_z = \frac{1}{2} \rho V_z^2 C_z B \quad (21)$$

$$M = \frac{1}{2} \rho V_z^2 C_M B^2 \quad (22)$$

U tim jednadžbama vrijednosti C_y , C_z i C_M predstavljaju koeficijente otpora oblika, silue podizanja i momenta propinjanja (možda bolje "zakretanja"); ρ je gustoća zraka; B je širina ploče ili rebra luka; D je vertikalna projekcija presjeka rasponskog sklopa ili ab luka. V_z je brzina vjeta na visini z , kao što je prikazano u jednadžbi (23):

$$V_z = \left(\frac{z}{10} \right)^{0,16} V_{10} \quad (23)$$

gdje V_{10} predstavlja proračunsku brzinu vjeta na visini od 10 m. Vrijednost od 40 m/s usvojena je za proračunsku brzinu vjeta na visini od 10 m. Tri komponente opterećenja vjetrom koje djeluju na luk (eng. *arch*) mosta prikazane su na slici 10.



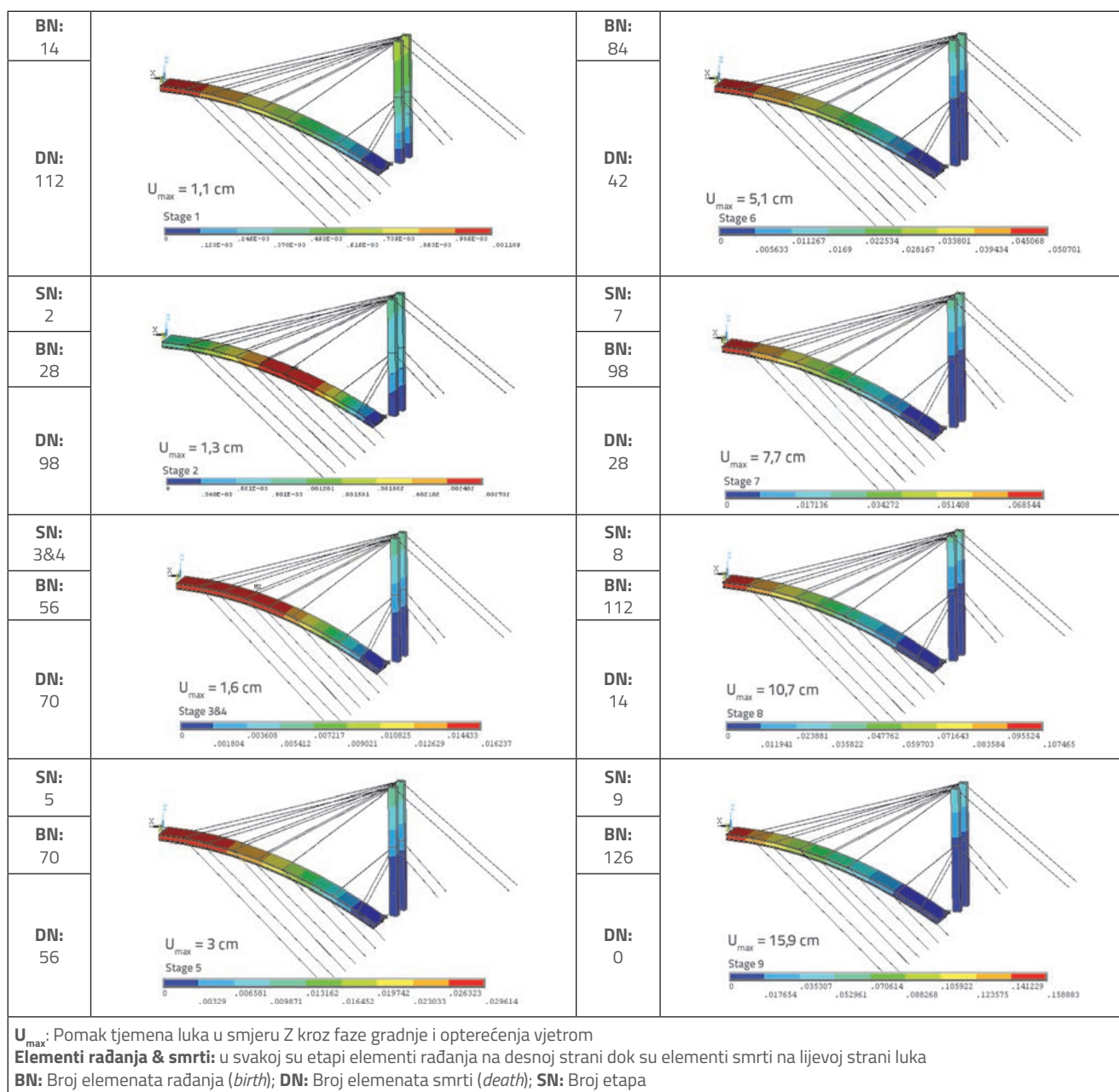
Slika 10. Tri komponente opterećenja vjetrom koje djeluju na luk mosta

6.2. Modeliranje faza građenja

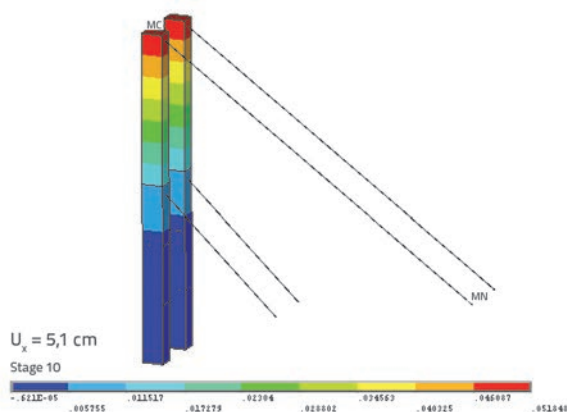
Betonski luk izveden je u fazama. U svakoj su fazi čelične zatege sidrene na čelični toranj, a oplata je učvršćena na dvije strane doline. U simulaciji etapnog građenja, koja se ovdje prikazuje, vrijednosti osnovnog vlačnog naprezanja i pomaka nisu prelazile dopuštene vrijednosti za toranj i betonski luk. Istovremeno je u obzir uzeto i opterećenje vjetrom na mjestu građenja. U numeričkoj je analizi usvojeno sedam etapa građenja. Detaljna analiza svih faza građenja obavljena je za jednu polovicu luka zbog simetričnog građenja, s osam segmenata za svaku polovicu otvora i s jednim završnim segmentom. Ovdje je prikazan

trodimenzionalan model koji je razvijen pomoću programa konačnih elemenata. Za simuliranje etapnog građenja mosta primijenjena je tehnika uključivanja i isključivanja elemenata. Analize su provedene za sve elemente betonskog luka i čeličnih zatega, kao što se može vidjeti iz rezultata dobivenih pomoću programa konačnih elemenata. U svakoj etapi, kada se betonira neki dio luka, njegovi se elementi smatraju uključenima, a drugi se elementi smatraju isključenima. Kada se element smatra isključenim, to znači da nema mase te da mu je modul elastičnosti jednak nuli.

Obavljena je analiza konstrukcije i ocjena analize naprezanja, što je omogućilo kontrolu sigurnosti konstrukcije. Uzeta je u



obzir i geometrijska nelinearnost. Ukupan pomak luka u svakoj fazi prikazan je na slici 11., sa stalnom težinom i opterećenjem vjetrom, na što se strogo pazilo tijekom gradnje mosta. Kao što se vidi na slici 11., pomak strelice na kraju luka polako se povećava tijekom postupne ugradnje i etapnog građenja. Kod početne ugradnje betona dolazi do pomaka od 1 mm, s tim da pomak dosiže vrijednost od 16 cm na polovici luka, uz pridržanje čeličnim zategama, što je manje od dopuštenog progiba. Horizontalan pomak tornja prikazan je na slici 12. Dopusnjeni se pomak određuje na osnovi preporuka iz kineske upute za cestovne mostove i iz australskog propisa za mostove [12, 13], gdje se navodi da progib pod radnim opterećenjem ne smije biti viši od jedne osamstotine visine tornja. Osim toga, sva naprezanja tijekom faza građenja trebaju biti manja od dopuštenog naprezanja materijala [16].



Slika 12. Horizontalni pomak tijekom građenja

7. Zaključak

U radu su prikazani rezultati dobiveni optimiziranjem uzdužnog presjeka lučnog mosta. Iz rezultata se mogu izvesti sljedeći zaključci:

- Izvedeni računalni kod omogućuje jednostavnu izmjenu modela konačnih elemenata (geometrija, fizikalna svojstva materijala, rubni uvjeti, element višeg reda, debljina pojasnice na presjeku luka i uzdužni presjek mosta). On uz to omogućuje i uključivanje novih kombinacija opterećenja u postupak optimalizacije.
- Zaključeno je da se metodom istovremenog stohastičkog predviđanja poremećaja može djelotvorno koristiti u postupcima za optimiziranje oblika mostova. Postupak optimalizacije oblika omogućuje znatno smanjenje težine konstrukcije. Tako je ukupan obujam armiranog betona dobiven u ovom istraživanju smanjen za 30 % u odnosu na analizirani projekt. Minimalni postignuti obujam donjeg ustroja iznosio je 1054 m³ u odnosu na 1504 m³ kod stvarnog projekta.
- Ograničenja se lako mogu prilagoditi problemu primjenom funkcije kazne i nizova proračunskih varijabli.
- Kod takvih bi mostova odnos visine luka u središnjem presjeku i visine u bočnom presjeku trebao iznositi manje od 1.
- Potrošnja betona smanjuje se usporedo sa smanjivanjem debljine hrpta u presjecima luka; međutim svako smanjenje ispod karakteristične debljine hrpta u presjeku luka rezultira neekonomičnim programom.

Isto tako, svako povećanje iznad debljine hrpta u presjeku luka rezultira neekonomičnim programom. Ovo se istraživanje može dodatno poboljšati na sljedeći način:

- analizom izvijanja optimalnog proračunskog modela pri stalnoj težini i opterećenju vjetrom;
- analizom nelinearnosti materijala i velikih utjecaja deformacija u proračunu konstrukcija;
- uključivanjem drugih konstrukcijskih elemenata kao što su stupovi i prednapeti T-nosači u postupak optimizacije i to u svojstvu proračunskih varijabli;
- uključivanjem optimalnog broja stupova kao proračunske varijable.

LITERATURA

- [1] Hepola, I., Marwedel, R.: Arch Bridges, Aalto University, Rak-11.3001 Design of Bridges, 2012.
- [2] Lute, V., Upadhyay, A., Kumar Singh, K.: Genetic Algorithms-Based Optimization of Cable Stayed Bridges, J. Software Engineering & Applications, 4(2011), pp. 571-578, DOI:10.4236/jsea.2011.410066
- [3] Baldomir, A., Hernandez, S., Nieto, F., Jurado, J.A.: Cable optimization of a long span cable stayed bridge in La Coruna (Spain), Advances in Engineering Software, 41(2010), pp. 931-938. DOI: 10.1016/j.advengsoft.2010.05.001
- [4] Aydin, Z., Ayvaz, Y.: Overall Cost Optimization of Prestressed Concrete Bridge using Genetic Algorithm, KSCE Journal of Civil Engineering, 17(2013)4, pp. 769-776. DOI: 10.1007/s12205-013-0355-4
- [5] Togan, V., Daloglu, A.: Design and Reliability Based Optimization of a 2D Arch Bridge, Journal of Engineering and Natural Sciences, 25(1), pp. 17-26., 2006.
- [6] Guan, H., Chen, Y.J., Loo, Y.C., Xie, Y.M., Steven, G.P.: Bridge Topology Optimization with Stress, Displacement and Frequency Constraints, Computer & Structures, 81(2003), pp. 131-145. DOI: 10.1016/S0045-7949(02)00440-6
- [7] Makiabadi, M.H., Baghlani, A., Rahnema, H., Hadianfard, M.A.: Optimal Design of Truss Bridges using Teaching-Learning- Based Optimization Algorithm, International Journal of Optimization in Civil Engineering, 3 (2013) 3, pp. 499-510.
- [8] Žderić, Ž., Runjić, A., Hrelja, G.: Design and Construction of Cetina Arch Bridge, Chinese-Croatia Joint Colloquium, Brijuni Islands, pp. 285-292, 2008.

- [9] Seyedpoor. S.M., Salajegheh. J., Salajegheh, E., Gholizadeh, S.: Optimal design of arch dams subjected to earthquake loading by a combination of simultaneous perturbation stochastic approximation and particle swarm algorithms. *Journal of Applied Soft Computing*. 11(2011); pp. 39–48. DOI: 10.1016/j.asoc.2009.10.014
- [10] Pouraminian, M., Pourbakhshian, S.: SPSA Algorithm Based Optimum Design of Longitudinal Section of Bridges. *Indian Journal of Science and Technology*, 7 (2014) 9, pp. 1327–1332.
- [11] Ministry of Communications of People's Republic of China, Specifications for Design of Reinforced Concrete and Prestressed Concrete Highway Bridges and Culverts (JTJ023-85), China Communications Press, Beijing, 2003.
- [12] AustRoad. 92, AustRoad Bridge design code. NSW: Australian Railway Association, 1992.
- [13] AASHTO, Standard specifications for highway bridges, American Association of State Highway and Transportation Officials, Washington, D.C. 2002.
- [14] Cheng, J., Li, Q.S.: Reliability analysis of long span steel arch bridges against wind-induced stability failure, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 97(2009), pp. 132–139. DOI: 10.1016/j.jweia.2009.02.001
- [15] Xiang, H.F., Chen, A.R., Lin, Z.X.: An introduction to the Chinese wind-resistant design guideline for highway bridges, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 74 -76(1998), pp. 903–911. DOI: 10.1016/S0167-6105(98)00082-8
- [16] Mahmud, H.M.I., Omar, M.A.: Effects of construction sequences on a continuous bridge, *IABSE-JSCE joint conferences on advances in bridge engineering-II*, Dhaka, Bangladesh, pp. 191–200, 2010.